مطالعهٔ تجربی شکل‌دهی غلتکی ورق‌های کامپوزیتی زمینه پی‌وی‌سی تقویت‌شده با الیاف شیشهٔ بافته‌شده*

وحید زال[۱]   حسن مسلمی نائینی[۲]   احمدرضا بهرامیان[۳]   بهروز شیرانی[۴]   امیرحسین بهروش[۵]

چکیده *در این مقاله برای نخستین بار به‌شکل‌دهی غلتکی ورق‌های کامپوزیتی زمینه گرمانرم آمورف پی‌وی‌سی پرداخته شده است. برای این منظور ورق‌های کامپوزیتی با دو چیدمان ۶[۹۰/۰] و ۶[۴۵/۴۵-] بااستفاده از فرآیند انباشت لایه‌ها و با ابعاد ۱۲×۸۰ سانتی‌متر تولید شدند. بعد از تعیین دمای مناسب شکل‌دهی، ورق‌های حاصل به‌شکل تک‌ایستگاهه به سه زاویه شکل‌دهی مختلف و هم‌چنین به‌شکل چندایستگاهه به دو پروفیل کانالی‌شکل در دمای ۱۷۰ ℃ شکل‌دهی غلتکی شدند و سه عیب هندسی شامل کمانی شدن پروفیل، موج لبه و برگشت فنری پروفیل بررسی شد. درانتها نتیجه گرفته شد که شکل‌دهی غلتکی چیدمان ۶[۹۰/۰] منجر به عیوب کمتری درمقایسه با چیدمان ۶[۴۵-/۴۵] می‌شود، هم‌چنین بخش عمدهٔ عیوب در ایستگاه نهایی شکل‌دهی غلتکی ایجاد می‌شود.*

واژه‌های کلیدی گرمانرم پی‌وی‌سی; لمینت‌های کامپوزیتی; شکل‌دهی غلتکی; عیوب هندسی.

Experimental Study of the Roll Forming of PVC / Glass Fabric Composite Laminates

V. Zal   H. Moslemi Naeini   A.R. Bahramian   B. Shirani   A.H. Behravesh

Abstract *Roll forming of amorphous PVC based composite laminates were studied in this paper for the first time. For this, $[0/90]_6$ and $[45/-45]_6$ lay-ups of this composite laminates with dimensions of 80×12 cm were fabricated using film stacking and hot pressing processes. The suitable forming temperatures of the composites were determined and then, the laminates were roll formed at 170℃ with a single stand and also multi stand roll forming process into channel sections. Geometrical defects including warping, flange waviness and spring back of the roll formed profiles were evaluated. Finally it was concluded that $[0/90]_6$ lay-up results in very lower defects in comparison with $[45/-45]_6$ lay-up, and also the final stand of roll forming process has dominant role on the defects of multi stand roll forming.*

Key Words PVC Thermoplastic, Composite Laminates, Roll Forming, Geometrical defects.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۹/۱۴ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۱۱/۲۴ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i2.51919

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. moslemi@modares.ac.ir

(۳) دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۴) مربی، موسسه آموزش عالی دانش‌پژوهان، اصفهان.

(۵) دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

مقدمه

استحکام به وزن بالا بـرای بسـیاری از صـنایع از قبیـل صنایع هواوفضا و خودرو اهمیت بالایی دارد کـه ایـن مسـئله موجـب گـرایش ایـن صـنایع بـه جـایگزینی محصولات متعـارف فلـزی بـا محصـولات کـامپوزیتی زمینه پلیمری شده است. کامپوزیت‌هـای زمینـه پلیمـر تقویت‌شده بـا الیـاف دارای مزایـای گسـترده‌ای نظیـر استحکام ویژه، جذب انرژی و استحکام خستگی بالاتر نسبت به فلزات هستند [1, 2]. این مزایا به‌خصوص در کامپوزیت‌های پلیمری زمینه گرمانرم بسـیار چشـم‌گیـر است. باوجود مزایا و اهمیت ایـن محصـولات، تولیـد کامپوزیت‌ها بـه‌شـکل قطعـهٔ نهـایی، فرآینـدی دسـتی، زمان‌بر و با مشکلات فنی بالا است که موجب افـزایش هزینهٔ محصول می‌شود [3].

پژوهش‌های زیادی برای ارائـهٔ روش‌هـای جدیـد تولید محصـولات کـامپوزیتی و یـا اعمـال فرآینـدهای متعــارف و ارزان تولیــد محصــولات فلــزی بــرروی محصولات کامپوزیتی انجام گرفته است. شکل‌دهـی از جمله فرآیندهای ارزان و سریع است کـه بـرای تولیـد انبوه بسـیاری از قطعـات و محصـولات فلـزی بـه‌کـار می‌رود [4]. در حالی‌که فلزات به‌شکل سـرد بـه‌وسـیلهٔ اعمال کشش یا فشار به‌شکل هم‌سانگرد شکل می‌یابند، الیاف در کامپوزیت‌ها غیر قابل کرنش پلاستیک هستند، بنابراین در شکل‌دهی کامپوزیت‌هـای الیـافی، بـه‌جـای تغییر شکل الیاف، باید موقعیت الیاف تغییـر کنـد و بـا جابه‌جایی الیـاف درون زمینـه و یـا لغـزش لمینـت‌هـا برروی یکدیگر، امکان تغییر شکل ایجاد شود [5].

بــرای ایجــاد قابلیــت جابــه‌جــایی الیــاف درون لمینت‌های کامپوزیتی، بایـد زمینـه بسـیار نـرم شـود و مقاومت برشی چندانی در برابـر جابـه‌جـایی الیـاف از خود نشان ندهد. بنابراین شکل‌دهی در شرایط دما بـالا که زمینهٔ گرمانرم، نرم و کم‌اسـتحکام مـی‌شـود، شـرط لازم برای موفقیـت فرآینـد شـکل‌دهـی کامپوزیـت‌هـا خصوصاً در تغییر شکل‌های بزرگ محسوب مـی‌شـود [6]. با این وجود، شـکل‌دهـی کامپوزیـت‌هـای زمینـه گرمـانرم درمقایسـه بـا ورق‌هـای فلـزی بـا مشـکلات فرآیندی زیادی روبه‌رو اسـت و تولیـد قطعـات نسـبتاً پیچیده منجر به ایجاد عیوب زیادی از قبیـل کمـانش و چروکیدگی الیاف، جـدایش لمینـت‌هـا، پـاره شـدن و شکست الیاف می‌شود [7] که بسـیاری از ایـن عیـوب تابع شرایط پلیمر زمینه، چیدمان و نوع الیاف هستند.

پژوهش‌های بسیاری برروی بررسی این عیـوب و شـکل‌دهـی قطعـات سـالم کـامپوزیتی بـا فرآینـدهای مختلف انجام گرفتـه اسـت. صـدیقی و همکـاران [8]، تـأثیر ترتیـب لایـه‌چینـی بـرروی چروکیـدگی ورق و عیوب هندسی در شکل‌دهی پرسی ورق‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با زمینهٔ پلـی‌پـروپیلن را بررسـی کردنـد و نتیجه گرفته‌اند کـه چیـدمان الیـاف مهـم‌تـرین پـارامتر فرآیند است. هالندر و همکاران [9] بـه بررسـی تولیـد مقطع ناودانی‌شکل با روش شکل‌دهـی خـلأ ورق‌هـای کامپوزیتی تـک‌جهتـه زمینـه اپوکسـی بـه‌همـراه ذرات گرمانرم افزاینده چگرمگی پرداختنـد و تـأثیر پارامترهـا برروی چروکیدگی الیاف را بررسی کردند. یانگیموتو و ایکوچی [10] از ورق‌های محافظ فلـزی در دو سـطح ورق کامپوزیتی بـرای افـزایش شـکل‌پـذیری اسـتفاده کردند که بعد از فرآینـد ایـن لایـه‌هـای فلـزی حـذف می‌شوند. با این فرآیند توانستند شکل‌پذیری ورق‌هـای کامپوزیتی را افزایش دهند.

شکل‌دهی غلتکـی از فرآینـدهای بسـیار سـریع و اقتصادی در تولید پروفیل‌های فلـزی اسـت کـه بـرای تولید پیوستهٔ بسیاری از پروفیـل‌هـا بـا مقـاطع سـاده و پیچیده به‌کار می‌رود. شکل‌دهی ورق‌های کامپوزیتی بـا این روش و تولید پروفیـل‌هـای کـامپوزیتی نیـز مـورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. اولین تحقیق را در ایــن زمینــه دایکــس و همکــاران [11]، بــرروی کامپوزیـت‌هـای الیـاف تـک‌جهتـهٔ شیشـه بـا زمینـهٔ

پلی‌پروپیلن انجام دادند و به بررسی قابلیت شکل‌دهی غلتکی این محصولات پرداختند و اگرچه قابلیت شکل‌دهی غلتکی ورق‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری را تایید کردند، عیوب فرآیندی بسیاری را مشاهده کردند. در ادامه هنینگر و فردریش [12] ورق‌های کامپوزیتی زمینه پلی‌پروپیلن و پلی‌امید تقویت‌شده با الیاف شیشهٔ بافته‌شده را به مقطع کلاهی شکل‌دهی غلتکی کردند و شرایط کاهش عیوب شکل‌دهی را بررسی کردند. نکته‌ای که در این دو تحقیق به آن تاکید شده است ایجاد عیوب هندسی بسیار بالا و عدم کنترل و پایداری ورق‌کامپوزیتی در شرایط کرنشی به‌دلیل حالت نیمه‌ذوب زمینه است.

اکثر گرمانرم‌هایی که به‌عنوان زمینهٔ کامپوزیت‌ها برای شکل‌دهی مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند، گرمانرم‌های نیمه‌کریستالی مانند پلی‌پروپیلن و یا پلی‌آمید هستند که بازهٔ دمایی شکل‌دهی این کامپوزیت‌ها محدود به دمای ذوب تا دمای تبلور مجدد زمینه (حدود ۱۰-۲۰ درجهٔ سلسیوس زیر دمای ذوب زمینهٔ نیمه‌کریستالی) است. شکل‌دهی در دماهای بالاتر از دمای تبلور مجدد، به‌علت سیالیت بالای زمینه، عیوب هندسی شدیدی مثل جابه‌جایی الیاف و تغییر موقعیت لبه را ایجاد می‌کند و هم‌چنین شکل‌دهی در دماهای پایین‌تر از تبلور مجدد، اجازهٔ حرکت به الیاف را نمی‌دهد و درنتیجه تغییر شکل الاستیک و عیوبی نظیر جدایش لمینت‌ها را ایجاد می‌کند [13]. این بازهٔ دمایی محدود، فرآیند شکل‌دهی این کامپوزیت‌ها را سخت می‌کند و موجب عیوب فراوان می‌شود.

در شکل‌دهی غلتکی نسبت به سایر فرآیندهای شکل‌دهی کنترل کمی برروی ورق وجود دارد و ورق تماس کمی با غلتک‌ها دارد، این مسئله در کنار این‌که شکل‌دهی در حالت نیمه‌ذوب زمینهٔ نیمه‌کریستالی انجام می‌گیرد، موجب عدم موفقیت چندان پژوهش‌های انجام‌گرفته برروی شکل‌دهی غلتکی ورق‌های کامپوزیتی درمقایسه با سایر فرآیندها شده است. باتوجه به این موضوع، در صورت استفاده از زمینهٔ گرمانرم مناسب، بسیاری از این عیوب قابل جبران و حذف هستند.

گرمانرم آمورف پی‌وی‌سی به‌دلیل این‌که نقطهٔ ذوب مشخص و هم‌چنین تبلور مجدد ندارد، با اعمال حرارت به‌تدریج نرم و خمیری و با کاهش دما به تدریج سفت‌تر می‌شود، بنابراین رفتار شکل‌پذیری بسیار بهتری دارد و بازهٔ دمای شکل‌دهی گسترده‌ای دارد به‌طوری‌که در دمای شکل‌دهی، به‌جای ذوب حالت خمیری پیدا می‌کند. بنابراین درصورت استفاده به‌عنوان زمینهٔ کامپوزیت‌ها، فرآیند شکل‌دهی غلتکی را بسیار تسهیل می‌کند و بسیاری از عیوب شکل‌دهی را که ناشی از ناپایداری زمینه هستند می‌تواند حذف کند. در کنار قابلیت شکل‌پذیری خوب، استحکام و قابلیت تولید ورق‌های اولیهٔ کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر چه پی‌وی‌سی به‌دلیل عدم ذوب و ویسکوزیتهٔ بالا دارای قابلیت آغشتگی ضعیفی است، اما به‌دلیل این‌که دارای گروه‌های عاملی قطبی است، خاصیت چسبندگی خیلی بالایی دارد و می‌تواند کامپوزیت‌های یکپارچه و مستحکمی ایجاد کند. زال و همکاران [14, 15] قابلیت ایجاد آغشتگی خوب و تولید محصولات کامپوزیتی زمینه پی‌وی‌سی با استحکام بالا را بررسی و تأیید کردند.

باوجود مزایای گرمانرم آمورف پی‌وی‌سی برای افزایش قابلیت شکل‌دهی، تا به حال پژوهشی راجع به‌شکل‌دهی کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی انجام نگرفته است. باتوجه به این مسئله، در این پژوهش برای نخستین بار به تعیین دمای مناسب شکل‌دهی و شکل‌دهی غلتکی کامپوزیت‌های پی‌وی‌سی/الیاف شیشه پرداخته شده است.

روند تجربی

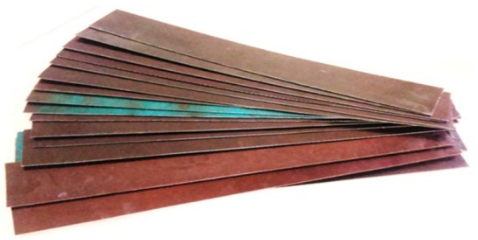
مواد و روش تولید ورق‌های اولیه. برای فاز زمینه از گرمانرم پی‌وی‌سی نیمه‌سخت (با نرم‌کنندهٔ دی‌اکتیل‌فتالات) به‌شکل فیلم با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر استفاده شده است. دمای انتقال شیشه‌ای که به‌منزلهٔ دمای تغییر رفتار ماده از حالت شیشه‌ای و ترد به حالت لاستیکی و بسیار نرم است، برای فیلم پی‌وی‌سی به‌کار رفته ۷۴ °C و دمای تخریب آن ۲۹۶ °C است. برای فاز تقویت‌کننده نیز الیاف شیشه بافت مسطح گرید E با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر مترمربع استفاده شده است.

برای تولید نمونه‌ها از فرآیند انباشت لایه‌ها، به‌همراه پرس گرم استفاده شده است. برای این منظور شش لایه الیاف شیشه به‌شکل یک در میان و با دو چیدمان ۶[۹۰/۰] و ۶[۴۵/۴۵-] در میان هفت لایه فیلم پی‌وی‌سی قرار گرفته است و با اعمال حرارت ۲۳۰ °C و فشار ۱/۵ مگاپاسکال در طول ۵ دقیقه (شرایط بهینه برای تولید کامپوزیت‌های زمینه پی‌وی‌سی [۱۶])، ورق‌های کامپوزیتی به‌شکل یکپارچه و همگن و با ضخامت ۲/۲۵ میلی‌متر تولید شده‌اند که منجر به تولید لمینت‌های کامپوزیتی با خواص مکانیکی مطابق جدول (۱) می‌شود.

جدول ۱ مشخصات لمینت‌های کامپوزیتی زمینه پی‌وی‌سی تولیدشده در شرایط ۲۳۰ °C ، ۱/۵ مگاپاسکال و ۵ دقیقه

درصد حجمی الیاف	درصد حجمی تخلخل	چگالی (kg/m3)	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
28.1	1.6	1622	220	10

به‌منظور شکل‌دهی غلتکی، نمونه‌های کامپوزیتی با ابعاد ۱۲×۸۰ سانتی‌متر بریده شدند که در شکل (۱) نمونه‌های اولیهٔ آماده‌شده برای شکل‌دهی غلتکی نشان داده شده است. هم‌چنین به‌منظور تعیین دمای مناسب شکل‌دهی، نمونه‌های مستطیلی در ابعاد ۱۲×۱۱ سانتی‌متر تهیه شدند تا این نمونه‌ها در ابتدا تحت شکل‌دهی پرسی (که فرآیند ساده‌تری است) قرار بگیرند و دمای مناسب برای شکل‌دهی غلتکی مشخص شود.



شکل ۱ نمونه‌های کامپوزیتی اولیهٔ تولیدشده به ابعاد ۱۲×۸۰ سانتی‌متر به‌منظور شکل‌دهی غلتکی

روند شکل‌دهی غلتکی. برای شکل‌دهی غلتکی نمونه‌های تولیدشده از یک ماشین شکل‌دهی غلتکی هفت‌ایستگاهه متعارف برای شکل‌دهی فلزات و با اعمال تغییرات لازم استفاده شده است.

افزایش دمای نمونه شرط لازم برای ایجاد قابلیت شکل‌پذیری کامپوزیت‌های زمینه گرمانرم است. بنابراین برای تعیین دمای مناسب شکل‌دهی، نمونه‌های تهیه شده برای شکل‌دهی پرسی، در دماهای مختلف شکل‌دهی شدند که درنتیجه دمای ۱۶۰°C، حداقل دمای مناسب برای تغییر شکل لمینت‌های کامپوزیتی تعیین شد.

باتوجه به این‌که افزایش دمای شکل‌دهی، موجب کاهش استحکام ورق‌کامپوزیتی و درنتیجه کاهش پایداری فرآیند شکل‌دهی غلتکی می‌شود، بنابراین حداقل دمای ممکن برای شکل‌دهی لمینت‌های کامپوزیتی موجب کمترین عیوب هندسی فرآیند شکل‌دهی غلتکی خواهد شد. با این وجود برای جبران افت دمای ناشی از سرد شدن نمونه در طول فرآیند شکل‌دهی، دمای شکل‌دهی غلتکی نمونه‌ها ۱۷۰ °C (۱۰°C بیشتر از حداقل دمای مناسب) لحاظ شد. بنابراین در ابتدای ماشین شکل‌دهی غلتکی مورد استفاده، کوره‌ای حرارتی تعبیه شده است که نمونه‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه توسط این کوره تا دمای ۱۷۰ °C گرم

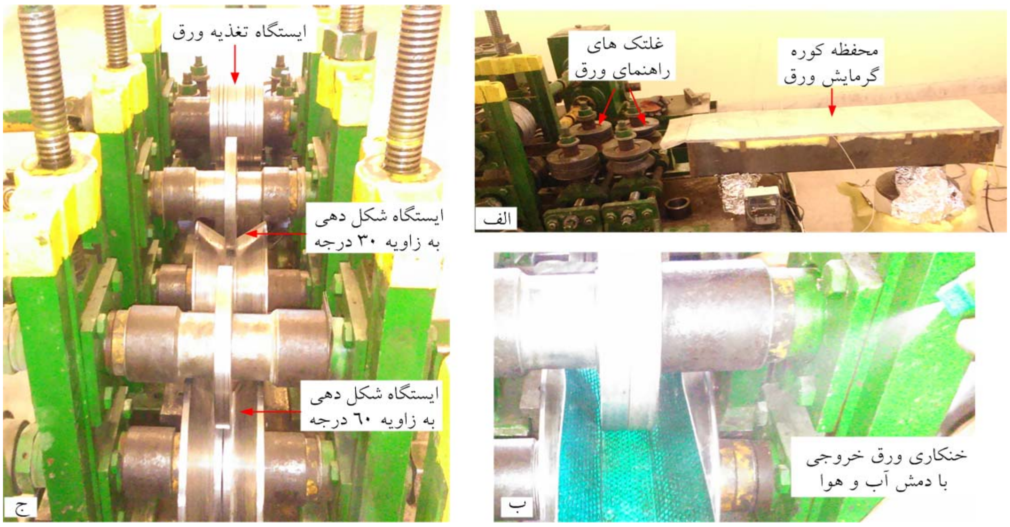
و به‌شکل همگن هم‌دما می‌شوند و سپس به میان یک جفت غلتک هدایت‌کننده منتقل می‌شوند تا نمونه را به میان غلتک‌های شکل‌دهی هدایت و تغذیه کند.

بعد از عبور نمونه از میان غلتک‌های شکل‌دهی و ایجاد فورم مورد نظر، نمونه باید سریعاً تا زیر دمای انتقال شیشه‌ای زمینه پی‌وی‌سی سرد شود تا تغییر ابعاد و برگشت فنری پروفیل نهایی کنترل شود. بنابراین در انتهای غلتک‌های شکل‌دهی، سیستم سردکنندهٔ افشانه آب تعبیه شده است. در شکل (۲) ماشین شکل‌دهی غلتکی و سیستم تغذیه و هدایت نمونه به داخل غلتک‌های شکل‌دهی نشان داده شده است.

شکل‌دهی با سرعت خطی ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه، قطر غلتک‌های شکل‌دهی ۱۸۵ میلی‌متر و فاصلهٔ بین ایستگاهی ۳۷۵ میلی‌متر انجام گرفته است.

پارامترهای مورد بررسی و طراحی آزمایش. برای بررسی شکل‌پذیری محصولات کامپوزیتی، دو چیدمان متداول مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به این که دو مکانیزم اصلی تغییر شکل لمینت‌های کامپوزیتی شامل لغزش لمینت‌ها برروی یکدیگر و کرنش خود لمینت است [17]، دو چیدمان الیاف [۰/۹۰] و [۴۵/-۴۵] که هرکدام از این دو مکانیزم را فعال می‌کنند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در چیدمان الیاف [۰/۹۰] به‌دلیل این که کرنش لمینت‌ها در طول الیاف بسیار کم است، لغزش لایه‌ها برروی یکدیگر تعیین‌کنندهٔ تغییر شکل نهایی خواهد بود. درحالی‌که در چیدمان [۴۵/-۴۵] بیشترین کرنش لمینت‌ها در جهت ۹۰ درجه (جهت کرنش اصلی ناحیهٔ خم) می‌تواند روی دهد، بنابراین هر دو مکانیزم لغزش لمینت‌ها برروی یکدیگر و تغییر طول خود لمینت‌ها فعال می‌شود.

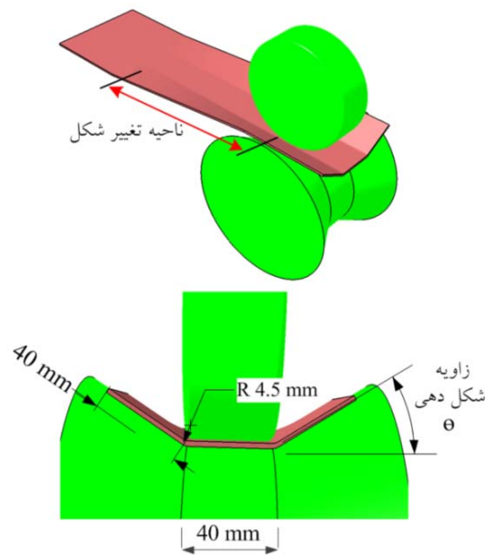
درابتدا به‌منظور تعیین الگوی گل شکل‌دهی به‌مقطع کانالی، فرآیند شکل‌دهی به‌صورت تک‌ایستگاهه و با سه زاویهٔ شکل‌دهی مختلف مطابق جدول (۲) انجام گرفته است تا حداکثر زاویهٔ خمکاری در هر ایستگاه و یا به‌عبارت دیگر الگوی گل شکل‌دهی غلتکی هرکدام از نمونه‌ها به‌دست آید. در شکل (۳) ابعاد پروفیل‌های حاصل نشان داده شده است.



شکل ۲ مجموعه‌های شکل‌دهی غلتکی ورق‌های کامپوزیتی، الف) سیستم گرمایش ورق در ابتدای خط شکل‌دهی، ب) سیستم خنکاری دمش آب و هوا در انتهای خط شکل‌دهی، ج) ماشین شکل‌دهی غلتکی (غلتک‌های تغذیهٔ ورق و شکل‌دهی)

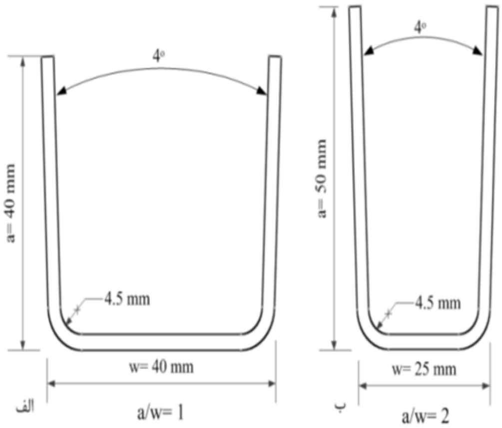
جدول ۲ حالت‌های مختلف شکل‌دهی غلتکی اعمال شده برروی نمونه‌ها

چیدمان الیاف	$[-۴۵/۴۵]_s$	$[۹۰/۰]_s$
زاویه شکل‌دهی تک‌ایستگاهه	۰ به ۳۰ ۰ به ۴۵ ۰ به ۶۰	۰ به ۳۰ ۰ به ۴۵ ۰ به ۶۰
زوایای شکل‌دهی چندایستگاهه پروفیل با a/w=1	۰، ۳۰، ۶۰، ۸۶	۰، ۳۰، ۶۰، ۸۶
زوایای شکل‌دهی چندایستگاهه پروفیل با a/w=2	۰، ۳۰، ۶۰، ۸۶	۰، ۳۰، ۶۰، ۸۶



شکل ۳ ابعاد و مشخصات پروفیل‌های حاصل از شکل‌دهی غلتکی تک‌ایستگاهه

درادامه به‌منظور ایجاد پروفیل کانالی شکل، از شکل دهی غلتکی چهارایستگاهه با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۸۶ درجه برای هرکدام از چیدمان‌های الیاف استفاده شد و پروفیل‌های کانالی با دو ابعاد مختلف مطابق شکل (۴) ایجاد شد تا اثر ابعاد فلنج برروی ایجاد عیوب نیز بررسی شود.



شکل ۴ ابعاد و مشخصات پروفیل‌های کانالی شکل‌دهی غلتکی‌شده با نسبت فلنج به وب ۱ (الف) و ۲ (ب).

سه زاویهٔ شکل‌دهی تک‌ایستگاهه در کنار دو حالت شکل‌دهی چندایستگاهه برای هر کدام از چیدمان‌ها، موجب ایجاد ۱۰ حالت شکل‌دهی مطابق جدول (۲) می‌شود که باتوجه به دو تکرار هر حالت، در مجموع ۲۰ نمونه تولید شد.

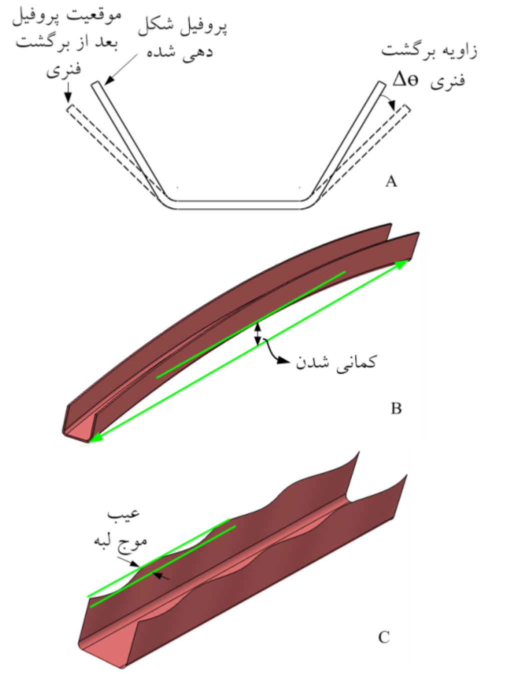
اندازه‌گیری‌ها

بررسی عیوب شکل‌دهی در ناحیهٔ خم. باتوجه به اهمیت دما برروی شکل‌پذیری لمینت‌های کامپوزیتی زمینهٔ گرمانرم، در ابتدا مقطع ناحیهٔ خم نمونه‌های شکل‌دهی پرسی شده بااستفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری بررسی شد و اثر دمای شکل‌دهی برروی بروز عیوب ناحیهٔ خم نظیر چروکیدگی و کمانش الیاف در کرنش‌های فشاری بررسی شد و دمای مناسب شکل‌دهی تعیین گردید.

عیوب هندسی شکل‌دهی غلتکی. در فرآیند شکل‌دهی غلتکی، یک ناحیهٔ تغییر شکل قبل از ورودی غلتک‌ها وجود دارد که در این ناحیه ورق صاف اولیه تغییر زاویهٔ تدریجی می‌یابد و در زیر غلتک‌ها زاویهٔ نهایی غلتک را به خود می‌گیرد (شکل ۳). این تغییر شکل تدریجی در این ناحیه موجب ایجاد کرنش‌های کششی طولی در لبهٔ پروفیل (علاوه بر کرنش مماسی

در ناحیهٔ خم که درواقع تعیین‌کنندهٔ زاویهٔ خم و شکل پروفیل است) می‌شود. اگر این کرنش‌ها در ناحیهٔ الاستیک ورق باشد، بعد از عبور ورق از زیر غلتک‌ها و دریافت زاویهٔ مورد نظر، کرنش‌های طولی به حالت اولیهٔ خود برمی‌گردد و لبهٔ پروفیل صاف و بدون عیب ایجاد می‌شود. در صورتی که کرنش‌های طولی ایجادشده دائمی باشند، بعد از عبور ورق از میان غلتک‌ها، عیوب هندسی در لبهٔ پروفیل ایجاد می‌شود.

در واقع یکی از محدودیت‌های اصلی در شکل‌دهی غلتکی همین عیوب هندسی لبهٔ پروفیل‌ها است. دو عیب متعارف حاصل از این کرنش‌های کششی در لبه شامل موج لبه و کمانی شدن پروفیل هستند. هم‌چنین کرنش‌های الاستیک در ناحیهٔ خم (کرنش در جهت مماس بر ناحیهٔ خم) موجب ایجاد برگشت فنری می‌شود که این عیب نیز دقت ابعادی محصول نهایی را به‌هم می‌زند. در شکل (۵)، این سه عیب و نحوهٔ کمی‌سازی آنها در این مقاله نشان داده شده است.

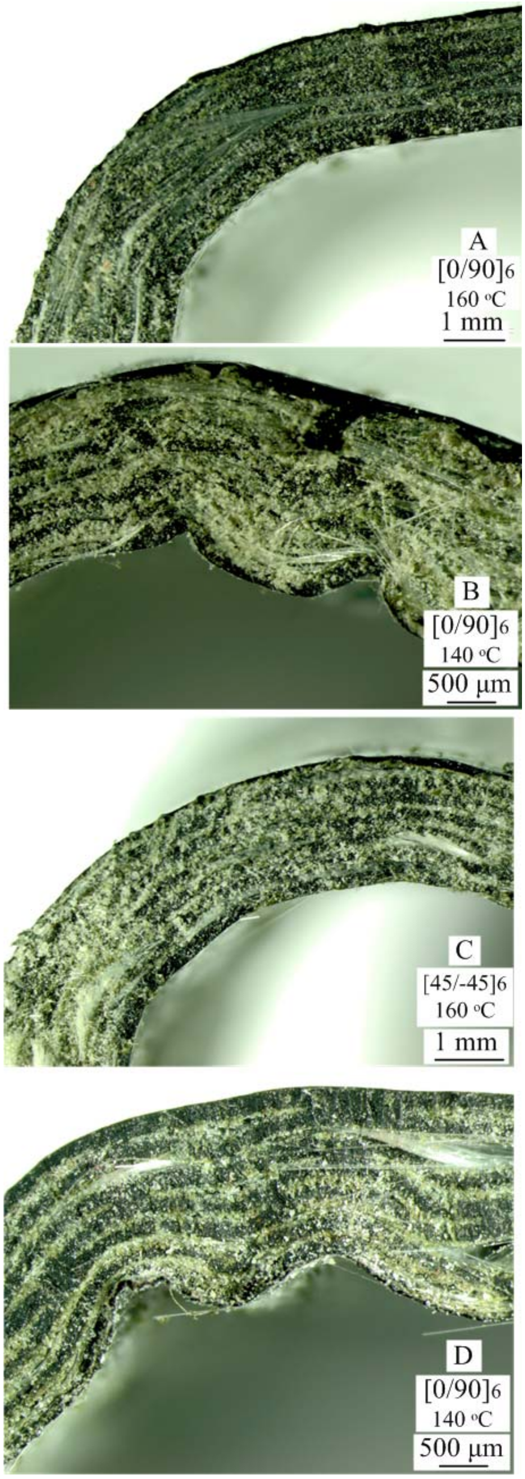


شکل ۵ عیوب هندسی متداول در شکل‌دهی غلتکی، A) عیب برگشت فنری، B) عیب کمانی‌شدن و C) عیب موج لبه

برای اندازه‌گیری دو عیب کمانی شدن و موج لبه از ساعت اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. بدین شکل که برای اندازه‌گیری مقدار کمانی شدن، نمونه برروی سطح مرجع افقی قرار گرفت و سپس کف پروفیل در طول نمونه با ساعت اندازه‌گیری جاروب شد. اختلاف بیشترین و کمترین ارتفاع اندازه‌گیری‌شده توسط ساعت معادل عیب کمانی شدن درنظر گرفته شد (شکل ۵-B). برای عیب موج لبه نیز بااستفاده از ساعت اندازه‌گیری لبهٔ فلنج‌ها در بالاترین ارتفاع جاروب شد و دامنهٔ تغییرات اندازه‌گیری‌شده به‌عنوان مقدار عیب موج لبه درنظر گرفته شد (شکل ۵-C). برای اندازه‌گیری برگشت فنری نیز از گونیا با دقت ۵ دقیقه استفاده شد. باتوجه به این‌که عیب موج لبه بر میزان برگشت فنری اندازه‌گیری‌شده اثر می‌گذارد، اندازه‌گیری برگشت فنری در بیش از ۱۲ موقعیت مختلف (شش نقطه از هر فلنج) انجام گرفت و میانگین اندازه‌گیری‌ها به‌عنوان مقدار برگشت فنری درنظر گرفته شد (شکل ۵-A).

نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپی ناحیهٔ خم. با بررسی تصاویر میکروسکوپی ناحیهٔ خم نمونه‌های اولیهٔ شکل‌دهی پرسی‌شده، مشاهده شد که در دماهای شکل‌دهی پایین، الیاف در سطح داخلی ناحیهٔ خم (ناحیهٔ کرنش‌های فشاری) دچار کمانش خارج از صفحه می‌شوند. این عیب علاوه بر کاهش خواص مکانیکی نمونه‌ها، صافی سطوح نمونه‌ها را نیز کاهش می‌دهد. با افزایش دمای شکل‌دهی این عیب کمتر شده و در دمای ۱۶۰°C هر دو چیدمان الیاف به‌سهولت و بدون عیب کمانش و چروکیدگی الیاف شکل‌دهی شده‌اند. در شکل (۶) نمونه‌هایی از تصویر میکروسکوپ نوری مقطع ناحیهٔ خم لمینت‌های کامپوزیتی شکل‌دهی‌شده در دو دمای ۱۶۰°C و ۱۴۰°C نشان داده شده است.



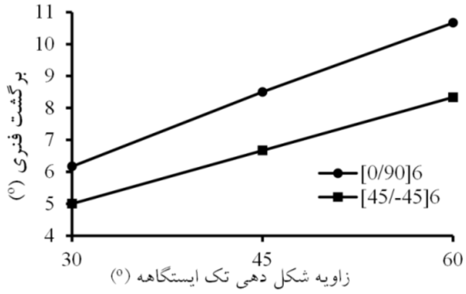
شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری مقطع ناحیهٔ خم کامپوزیت‌های شکل‌دهی‌شده در دو دمای ۱۶۰°C (A &C) و ۱۴۰°C (B&D)

همان‌طور که در شکل (۶–A و C) ملاحظه می‌شود، در دمای ۱۶۰°C، هر دو چیدمان لمینت‌های کامپوزیتی بدون هیچ‌گونه کمانش و چروکیدگی الیاف (که عیب اساسی شکل‌دهی کامپوزیت‌ها در ناحیهٔ خم هستند) شکل‌دهی شده‌اند. در این شرایط دمایی، در حین شکل‌دهی، لمینت‌ها برروی هم به‌راحتی می‌لغزند و درنتیجه کرنش فشاری برروی الیاف که منشأ کمانش و چروکیدگی است ایجاد نمی‌شود. درحالی‌که در دمای شکل‌دهی ۱۴۰°C (شکل۶–B و D) کمانش خارج از صفحهٔ لمینت‌ها روی داده است و مشاهده می‌شود که مقطع نمونه کاملاً چروک و ناصاف است. درواقع روند مذکور بیان می‌کند که زمینهٔ پی‌وی‌سی در دمای ۱۴۰°C همچنان مستحکم است و اجازهٔ لغزش لمینت‌ها برروی یکدیگر را نمی‌دهد.

افزایش بیشتر دمای شکل‌دهی (بالاتر از ۱۶۰°C) موجب بهبود شرایط کرنش‌پذیری و لغزش لمینت‌ها برروی همدیگر می‌شود، ولی به‌دلیل نرم شدن زیاد زمینه، پایداری و کنترل ورق سخت می‌شود. بنابراین به‌دلیل این‌که در فرآیند شکل‌دهی غلتکی کنترل کمی برروی ورق وجود دارد و نرم شدن بیش از حد نمونه موجب عدم پایداری فرآیند می‌شود، دمای شکل‌دهی غلتکی نمونه‌ها برروی کمترین دمای مناسب تنظیم و ۱۰°C گرمایش بیشتر برای جبران سرد شدن در طول فرآیند لحاظ شده است.

برگشت فنری پروفیل‌های شکل‌دهی غلتکی‌شده. برگشت فنری هر کدام از پروفیل‌های شکل‌دهی‌شده اندازه‌گیری شده و در شکل (۷) ارائه شده است.

ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویهٔ شکل‌دهی، میزان برگشت فنری لمینت‌های کامپوزیتی به‌صورت خطی بیشتر می‌شود. درحالی‌که در روند متعارف شکل‌دهی فلزات، افزایش زاویهٔ شکل‌دهی موجب کاهش برگشت فنری می‌شود.



شکل ۷ نتایج برگشت فنری نمونه‌های کامپوزیتی شکل‌دهی غلتکی شده به‌صورت تک‌ایستگاهی

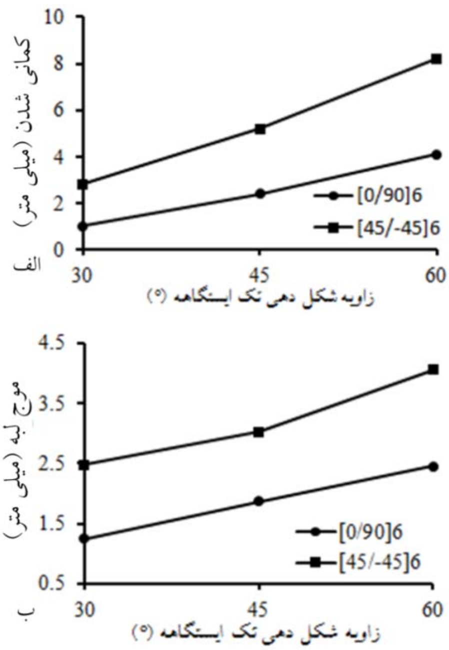
این مسئله بیانگر یک ماهیت اساسی در تغییر شکل‌های لمینت‌های کامپوزیتی است، بدین شکل که لمینت‌های کامپوزیتی کرنش پلاستیک ندارند (به‌دلیل حضور الیاف) و در طول فرآیند شکل‌دهی، کرنش این لمینت‌ها در هر دو چیدمان به‌صورت الاستیک است که موجب ذخیره شدن انرژی الاستیک می‌شود. بعد از شکل‌دهی و سرد شدن نمونه تا دمای محیط، استحکام و مدول لمینت‌ها افزایش می‌یابد و درنتیجه انرژی الاستیک ذخیره‌شده قادر به برگرداندن ورق به حالت اولیه نیست و تنها منجر به برگشت فنری در نمونه می‌شود. باتوجه به این مسئله، هرچه زاویهٔ شکل‌دهی بیشتر باشد، نیروی شکل‌دهی نیز بیشتر می‌شود و درنتیجه انرژی الاستیک ذخیره می‌گردد و برگشت فنری نیز بیشتر می‌شود.

روند تشریح‌شده برای مکانیزم تغییر شکل لغزش لمینت‌ها برروی یکدیگر نیز صادق است، باتوجه به این‌که حد فاصل بین لمینت‌ها پلیمر پی‌وی‌سی قرار دارد، در دمای شکل‌دهی اعمال‌شده پلیمر آمورف پی‌وی‌سی به‌صورت ماده‌ای هایپرالاستیک [18] عمل می‌کند که درنتیجه هرچه لغزش بیشتر باشد، انرژی الاستیک ذخیره شده نیز بیشتر می‌شود.

نکتهٔ دیگر بالاتر بودن برگشت فنری چیدمان الیاف [۰/۹۰] نسبت به چیدمان [۴۵-/۴۵] است. این مسئله به‌دلیل مدول الاستیک بالاتر لمینت‌ها در راستای الیاف (راستای خم در این چیدمان) است که درنتیجه در طول شکل‌دهی موجب ذخیرهٔ انرژی و برگشت فنری بیشتری می‌شود.

در شکل‌دهی ورق‌های فلزی، با افزایش زاویهٔ خم ناحیهٔ دارای کرنش پلاستیک در راستای ضخامت ورق بیشتر می‌شود و ناحیهٔ کرنش الاستیک کمتر می‌گردد. درنتیجه میزان انرژی ذخیره‌شده کمتر می‌شود و به دنبال آن برگشت فنری نیز کمتر می‌گردد.

کمانی و موجدار شدن لبهٔ پروفیل‌ها. کمانی شدن پروفیل و موج لبه نیز از دیگر عیوب متعارف فرآیند شکل‌دهی غلتکی هستند که معمولاً محدودکنندهٔ اصلی حداکثر زاویهٔ خم در هر ایستگاه هستند و نیاز به بررسی دارند. در شکل (۸) مقادیر این دو عیب برای پروفیل‌های شکل‌دهی تک‌ایستگاهه ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش زاویهٔ شکل‌دهی موجب افزایش هر دو عیب موج لبه و کمانی شدن می‌شود.



شکل ۸ نتایج کمانی شدن پروفیل (الف) و موج لبه (ب) در نمونه‌های کامپوزیتی شکل‌دهی غلتکی شده به‌صورت تک‌ایستگاهی

کرنش‌های الاستیک طولی لبهٔ پروفیل در ناحیهٔ خم موجب افزایش طول لبه‌های پروفیل می‌شود، درحالی‌که کف پروفیل هیچ‌گونه تغییر شکل و کرنش طولی را دریافت نمی‌کند. بنابراین بعد از شکل‌دهی که پروفیل سریع سرد می‌شود، بخشی از این کرنش‌های الاستیک به حالت اولیهٔ خود بر نمی‌گردند و درنتیجه طول لبهٔ پروفیل از کف آن بیشتر می‌شود (کرنش‌های دائمی ایجاد می‌شود). این مسئله موجب کمانی شدن و هم‌چنین کمانش لبهٔ پروفیل و ایجاد موج می‌شود. هرچه زاویهٔ شکل‌دهی در یک ایستگاه بیشتر باشد، کرنش‌های طولی در لبهٔ پروفیل نیز بیشتر می‌شود [19]، درنتیجه عیوب ایجاد شده نیز بیشتر می‌شود. عزیزی [۲۰] نشان داد که بسته به میزان ضخامت ورق، نقش هر کدام از دو عیب کمانی شدن و موج لبه در جبران کرنش‌های دائمی لبهٔ پروفیل تغییر می‌کند. باتوجه به این‌که سفتی خمشی پروفیل به‌شکل خطی وابسته به ضخامت ورق است درحالی‌که سفتی خمشی لبه‌ها با توان دوم ضخامت تغییر می‌کند، بنابراین در ضخامت‌های کم افزایش زاویهٔ خم بیشتر موج لبه را تشدید می‌کند (زیرا سفتی خمشی فلنج‌ها بسیار کم است و به‌راحتی موج می‌گیرند) و اثر چندانی برروی کمانی شدن ندارد. برای ضخامت‌های بیشتر از ۱ میلی‌متر، افزایش کرنش‌های دائمی، این دو عیب را به موازات هم افزایش می‌دهد زیرا نیروی مقاوم در برابر موج لبه به‌شکل تعادلی بیشتر می‌شود و درنتیجه نیروهای مؤثر برای کمانی‌سازی پروفیل نیز بیشتر می‌شود. برای پروفیل‌ها با ضخامت بسیار بالا، عملاً موج لبه بسیار کم روی می‌دهد و هرگونه افزایش زاویهٔ خم عیب کمانی‌شدن را تشدید می‌کند و تأثیر ناچیزی برروی موج لبه دارد، هم‌چنین افزایش طول فلنج که سفتی خمشی را افزایش می‌دهد، اثر کاهشی برروی عیب کمانی‌شدن دارد [21]. درواقع اندازهٔ این دو عیب کمانی‌شدن و موج لبه به‌شکل تعادلی وابسته به سفتی خمشی پروفیل و سفتی خمشی فلنج است.

باتوجه به روند ذکرشده، برای ورق‌های شکل‌دهی‌شده، افزایش زاویهٔ شکل‌دهی عیب موج لبه را به‌شکل تعادلی افزایش می‌دهد و درنتیجه نیروی مقاوم در برابر موج لبه نیز افزایش می‌یابد و به‌تبع آن عیب کمانی شدن نیز بیشتر می‌شود.

نکتهٔ بااهمیتی که مشاهده می‌شود ایجاد عیب کمانی شدن و موج لبهٔ بیشتر در چیدمان الیاف [۴۵-/۴۵] است. در حالی‌که در اکثر فرآیندهای شکل‌دهی، عیوب شکل‌دهی چیدمان الیاف [۴۵-/۴۵] به‌دلیل کرنش‌پذیری راحت‌تر و تغییر زاویهٔ الیاف، بسیار کمتر است.

دلیل این مسئله رفتار الاستیک پایین و رفتار ویسکوالاستیک بالای لمینت‌ها درجهت [۴۵-/۴۵] است. در این چیدمان به‌دلیل نقش بالای زمینه پی‌وی‌سی در تغییر شکل‌ها، بخش عمدهٔ تنش‌های ایجادشده بعد از تغییر شکل آزاد می‌شوند (رفتار ویسکوالاستیک) بنابراین بعد از عبور ورق از زیر غلتک‌ها، کرنش‌های الاستیک ایجادشده در ناحیهٔ تغییر شکل به کرنش‌های دائمی تبدیل می‌شوند (تنش‌ها که نیروی محرکهٔ برگرداندن کرنش‌های الاستیک هستند آزاد می‌شوند). درحالی‌که در چیدمان [۰/۹۰]، الیاف در طول پروفیل قرار دارند و مدول الاستیک در این جهت بسیار بالا است و رفتار ویسکوالاستیک ناچیزی حاکم است که درنتیجه نیروی عکس‌العمل بالایی برای برگرداندن کرنش طولی لبه ایجاد می‌شود و بخش زیادی از این کرنش به حالت اولیه برمی‌گردد و کرنش‌های دائمی کمی ایجاد می‌شود. بنابراین دو عیب کمانی شدن و موج لبه که ناشی از کرنش‌های دائمی در لبه است، در پروفیل با چیدمان [۴۵-/۴۵] بیشتر روی می‌دهد.

باتوجه به این‌که عیب برگشت فنری قابل جبران است ولی ایجاد دو عیب موج لبه و کمانی شدن قابل جبران نیست، بنابراین می‌توان گفت که چیدمان الیاف

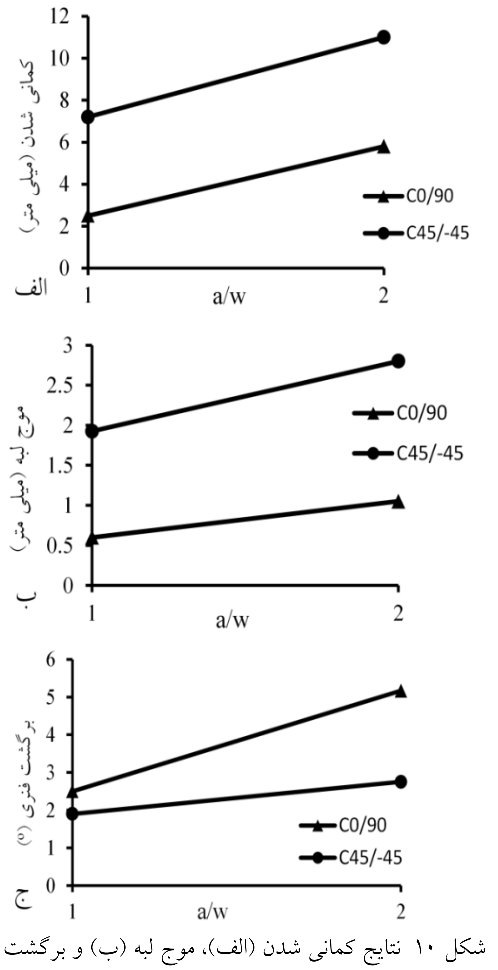
[۰/۹۰] برای شکل‌دهی غلتکی مناسب‌تر از چیدمان [۴۵/-۴۵] است.

شکل‌دهی چندایستگاهۀ پروفیل کانالی شکل. بعد از بررسی‌های مربوط به‌شکل‌دهی تک‌ایستگاهه، شکل‌دهی غلتکی پروفیل‌های مقطع کانالی انجام گرفت تا روند ایجاد عیوب مورد بررسی در حالت شکل‌دهی چندایستگاهه نیز بررسی شود. در شکل (۹) تصویر پروفیل کانالی (با نسبت فلنج به وب۱) لمینت کامپوزیتی با چیدمان [۰/۹۰] ارائه شده است.



شکل ۹ نمونه‌ای از ورق کامپوزیتی با چیدمان $[0/90]_s$، شکل‌دهی غلتکی شده به پروفیل کانالی با زوایای ۰،۳۰،۶۰ و ۸۶ درجه

با بررسی سه عیب مذکور در پروفیل‌های شکل‌دهی‌شده مشاهده شد که همانند شکل‌دهی تک‌ایستگاهه، عیب موج لبه و کمانی شدن در چیدمان $[45/-45]_s$ بسیار بیشتر از چیدمان $[0/90]_s$ است، به‌طوری‌که عیب موج لبه و کمانی شدن پروفیل چیدمان $[45/-45]_s$ با a/w=1، به‌ترتیب ۲ و ۷ میلی‌متر است در حالی‌که همین عیوب برای همان پروفیل با چیدمان $[0/90]_s$ به‌ترتیب ۰٫۵ و ۲ میلی‌متر است (شکل ۱۰). مشاهده می‌شود که برای چیدمان $[0/90]_s$ عیوب شکل‌دهی چندایستگاهه تقریباً برابر شکل‌دهی تک‌ایستگاهه است در حالی‌که برای چیدمان $[45/-45]_s$، در شرایط شکل‌دهی چندایستگاهه عیوب بیشتری روی داده است. به‌عبارت دیگر در چیدمان الیاف $[45/-45]_s$ عیوب ایستگاه‌های مختلف تقریباً انباشته می‌شوند ولی در شکل‌دهی چیدمان $[0/90]_s$ عیوب انباشته نمی‌شوند. در شکل (۱۰) اثر نسبت طول فلنج به وب (a/w) برروی عیوب مذکور ارائه شده است.



شکل ۱۰ نتایج کمانی شدن (الف)، موج لبه (ب) و برگشت فنری (ج) در شکل‌دهی چهارایستگاهۀ لمینت‌های کامپوزیتی با نسبت طول فلنج به وب مختلف

همان‌طورکه قبلاً بحث شد، کرنش طولی لبه و عدم برگشت این کرنش بعد از ایستگاه، ایجاد کنندهٔ این عیب است. در چیدمان $_{s}$[۰/۹۰] به‌دلیل این‌که مدول الاستیک طولی بسیار بالاتر است، کرنش‌های هر ایستگاه سریع به حالت اولیه برمی‌گردد (توجه شود که افت دمایی زیادی بین ایستگاه‌ها تا ایستگاه آخر روی نمی‌دهد)، درنتیجه عیب پروفیل نهایی بیشتر تحت تأثیر عیوب ایجادشده در ایستگاه آخر است. این در شرایطی است که برای چیدمان $_{s}$[۴۵-/۴۵]، به‌دلیل مدول الاستیک بسیار پایین در جهت طولی، و هم‌چنین اثر بسیار بالاتر رفتار ویسکوز زمینهٔ پی‌وی‌سی در این جهت، معمولاً بخشی از تنش‌ها آزاد می‌شوند و کرنش‌های دائمی ایجاد می‌شود. درنتیجهٔ این مسئله، بخشی از کرنش‌های هر مرحله برروی هم انباشته می‌شوند و پروفیل نهایی عیوب بیشتری نشان می‌دهد.

نکتهٔ بااهمیت دیگر نیز مربوط به عیب برگشت فنری می‌شود. این عیب نیز در طول فرآیند چندایستگاهه نه تنها انباشته نمی‌شود بلکه از برگشت فنری تک‌ایستگاهه به زاویهٔ ۳۰ درجه نیز کمتر می‌شود. به‌دلیل این‌که فرآیند شکل‌دهی غلتکی چندایستگاهه در حالت تقریباً هم‌دما انجام می‌گیرد، درنتیجه بنا به خاصیت ویسکوالاستیک بالای زمینه در دمای شکل‌دهی، استراحت تنش در طول فرآیند رخ می‌دهد و تنش‌ها آزاد می‌شوند و درنتیجه بخش عمدهٔ تنش در ناحیهٔ خم از میان می‌رود و ایستگاه نهایی (که بلافاصله بعد از آن، پروفیل سرد می‌شود) تعیین‌کنندهٔ برگشت فنری نهایی می‌شود.

افزایش نسبت اندازهٔ فلنج به وب (a/w)، از ۱ به ۲ موجب تشدید بسیاری از عیوب مذکور می‌شود. به‌دلیل این‌که طول ناحیهٔ تغییر شکل و کرنش‌های طولی ایجادشده در این ناحیه وابسته به اندازهٔ فلنج است، درنتیجه افزایش این نسبت موجب افزایش کرنش‌های طولی مذکور می‌شود و درنتیجه عیوب هندسی نیز بیشتر می‌شود. برای هر دو چیدمان الیاف، این روند مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شکل‌پذیری و قابلیت شکل‌دهی غلتکی ورق‌های کامپوزیتی زمینه پی‌وی‌سی پرداخته شد. بدین منظور ورق‌های کامپوزیتی با دو چیدمان $_{s}$[۰/۹۰] و $_{s}$[۴۵-/۴۵] به‌روش انباشت لایه‌ها تولید شد و با موفقیت شکل‌دهی غلتکی تک‌ایستگاهه و چندایستگاهه شدند. نتایج زیر از این مقاله به‌دست می‌آیند:

۱. چیدمان الیاف [۴۵-/۴۵] به‌دلیل رفتار ویسکوز بالا و رفتار الاستیک بسیار پایین در جهت طولی ورق، موجب کرنش‌های دائمی بیشتر و درنتیجه عیوب موج لبه و کمانی شدن بسیار بیشتر از چیدمان الیاف [۰/۹۰] می‌شود. درحالی‌که عیب برگشت فنری چیدمان [۰/۹۰] در راستای خم، بسیار بیشتر است.
۲. کرنش‌های دائمی در ناحیهٔ خم به‌دلیل ایجاد کرنش‌های ویسکوالاستیک و سرد شدن سریع نمونه تا استحکام و صلبیت بالاتر روی می‌دهد، به همین دلیل افزایش زاویهٔ خم در هر دو چیدمان منجر به افزایش کرنش‌های الاستیک و برگشت فنری می‌شود.
۳. در شکل‌دهی غلتکی چندایستگاهه چیدمان [۰/۹۰]، عیوب بیشتر تابع ایستگاه آخر شکل‌دهی هستند و کرنش‌های نامطلوب ایستگاه‌های قبلی به‌شکل الاستیک برمی‌گردند درحالی‌که برای چیدمان [۴۵-/۴۵]، به‌دلیل رفتار ویسکوالاستیک بالا در جهت طول، تجمع عیوب در ایستگاه‌های مختلف انجام می‌گیرد.
۴. حداقل دمای مناسب برای شکل‌دهی ورق‌های کامپوزیتی زمینهٔ پی‌وی‌سی با هردو چیدمان ۱۶۰°C است.

سپاس‌گزاری

از شرکت پایا پروفیل واقع در شهرک صنعتی مورچه خورت اصفهان، بابت همکاری‌های لازم در جهت تأمین و اعمال تغییرات برروی ماشین شکل‌دهی غلتکی مورد استفاده، کمال سپاسگزاری اعلام می‌شود.

مراجع

1. Suong, D.G., Stephen, V.H. and Tsai, W., "*Composite Materials Design Application*", Florida: CRC Press, (2003).
2. Vogelesang, L.B. and Vlot, A., "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures", *J. Mater. Process. Technol.*, 103, pp. 1–5, (2000).
3. Parton, H. and Verpoest, I., "In situ polymerization of thermoplastic composites based on cyclic oligomers", *Polym. Compos.*, 26(1), pp. 60-65, (2005).
4. Kleiner, M., Geiger, M. and Klaus, A., "Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming", *Annals of the CIRP 52/2*, pp. 521–542, (2003).
5. Allaoui, S., Cellard, C. and Hivet, G., "Effect of inter-ply sliding on the quality of multilayer interlock dry fabric preforms", *Composites: Part A*, 68, pp. 336–345, (2015).
6. Davey, S., Das, R., Cantwell, W.J. and Kalyanasundaram, S., "Forming studies of carbon fibre composite sheets in dome forming processes", *Compos. Struct.*, 97, pp. 310–316, (2013).
7. Wang, P., Hamila, N. and Boisse, P., "Thermo forming simulation of multi layer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix", *Composites Part B: Engineering*, 52, pp. 127–136, (2013).
8. Sadighi, M., Rabizadeh, E. and Kermansaravi, F., "Effects of laminate sequencing on thermoforming of thermoplastic matrix composites", *J. Mater. Process. Technol.*, 201, pp. 725–730, (2008).
9. Hallander, P., Akermo, M., Mattei, C., Petersson, M.and Nyman, T., "An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates", *Composites: Part A*, 50, pp. 54–64, (2013).
10. Yanagimoto, J. and Ikeuchi, K., "Sheet forming process of carbon fiber reinforced plastics for lightweight parts", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, pp. 247–250, (2012).
11. Dykes, R.J., Mander, S.J. and Bhattacharyya, D., "Roll forming continuous fibre-reinforced thermoplastic sheets: experimental analysis", *Composites: Part A*, 31, pp. 1395–1407, (2000).
12. Henninger, F. and Friedrich, K., "Production of textile reinforced thermoplastic profiles by roll forming", *Composites: Part A*, 35, pp. 573–583, (2004).
13. Lynam, C., Milani., A. S., Trudel-Boucher, D. and Borazghi, H., "Predicting dimensional distortions in roll forming of comingled polypropylene/glass fiber thermoplastic composites: On the effect of matrix viscoelasticity", *J. Compos. Mater.*, 48(28), pp. 3539–3552, (2014).

۱۴. زال، وحید، مسلمی نائینی، حسن، بهرامیان، احمدرضا، عبداللهی، هادی، بهروش، امیرحسین، «بررسی اثر دمای فرآیند برروی خواص الاستیک و ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های الیاف شیشه/پی‌وی‌سی»، مجلهٔ مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۱۱، صص ۹-۱۶، (۱۳۹۴).

15. Zal, V., Moslemi Naeini, H., Bahramian, A.R., Abbaszadeh, B. and Abdollahi, H., "Analysis and optimization of tensile strength of PVC/fiberglass composite laminates", *4th International conference on composites (CCFA4)*, Tehran, Iran, (2014).

۱۶. زال، وحید، مسلمی نائینی، حسن، بهرامیان، احمدرضا، بهروش، امیرحسین، عبداللهی، هادی، «بررسی اثر زمان و دمای تولید برروی

استحکام کامپوزیت‌های ترموپلاستیکی پی‌وی‌سی تقویت‌شده با الیاف شیشه»، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، تهران، ایران، (۱۳۹۴).

17. Long, A.C. and Clifford, M.J, "*Composites forming technologies*", Woodhead publishing limited, Cambridge, (2007).
18. Loria, M.P., Clausen, A.H., Berstad, T. and Hopperstad, O.S., "Constitutive model for thermoplastics with structural applications", *International Journal of Impact Engineering*, 37, pp.1207-1219, (2010).
19. Safdarian, R. and Moslemi Naeini, H., "The effects of forming parameters on the cold rollforming of channelsection", *Thin-Walled Structures* , 92, pp. 130–136, (2015).

۲۰. عزیزی تفتی، روح‌اله، «بررسی نظری، عددی و تجربی عیب چین‌خوردگی لبه در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی متقارن»، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۹۲).

21. Shirani Bidabadi, B., Moslemi Naeini, H., Salmani Tehrani, M. and Barghikar, H., "Experimental and numerical study of bowing defects in cold roll-formed, U-channel sections", *J. Constr. Steel Res.*, 118, pp. 243–253, (2015).